

技術論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 43(2), 179-185(2015)

DOI:http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2015.43.2.179

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

단순화 된 열 저항 해석을 이용한 우주용 FPA 열제어 설계 방안 연구

장진수*, 양승욱, 김종운, 김이을

Study on Methodology of Trade-Off for Space-borne FPA
Thermal Design by Simplified Thermal Node Analysis

Jin-Soo Chang*, Seung-Uk Yang, Jong-Un Kim and Ee-Eul Kim

Satrec initiative

ABSTRACT

The main objective of thermal design for a space-borne FPA(Focal Plane Assembly) is to provide stable thermal environment during imaging operation and thus maintain the image quality. An FPA must be maintained within its operating temperature range and cooled down to its initial temperature soon enough for the next imaging operation.

This paper describes the study result on performing trade-off studies for FPA thermal design by using simplified thermal node analysis about FPA preliminary design. It also describes the verification results of the study by comparing thermal analysis results and trade-off study results. According to results, we can conclude that this approach is useful for simple and quick trade-off studies without thermal analysis based on thermal math models.

초 록

우주용 고해상도 전자광학카메라의 개발에 있어 초점면 배열 장치(Focal Plane Assembly, FPA)의 열제어 설계는 영상품질을 결정하는 중요한 요소이다. FPA 열제어 설계의 목표는 영상 촬영 기간 중 안정적인 열 환경을 제공하는 것으로, 촬영 기간 동안 운용 온도를 주어진 범위 내로 유지해야 하며 후속 촬영에 문제가 없도록 빠른 시간 내에 온도 초기화를 완료해야 한다.

상기의 두 항목인 온도 유지와 온도 초기화 중에서 FPA 구조 설계에 따른 영향을 가장 많이 받으며, 설계 변경의 자유도가 상대적으로 낮은 온도 유지 항목에 대하여 FPA 구조 설계 초기 단계부터 검토 및 반영이 가능한 단순화 된 열 저항 해석 기반의 온도 예측 방안을 정의하였다. 또한 열해석 결과와의 비교를 통해 온도 예측 방안을 검증, FPA 설계를 위한 trade-off에 효과적으로 사용할 수 있음을 확인하였다.

Key Words : Electro-Optical Camera(전자광학카메라), Thermal Node Analysis(열 저항 해석), Focal Plane Assembly(초점면 배열 장치), Detector(검출기), Trade-Off(인자 영향 비교)

† Received : September 23, 2014 Revised : January 15, 2015 Accepted : January 20, 2015

* Corresponding author, E-mail : jschang@satreci.com

1. 서론

(주)썬트렉아이는 우주환경에서 그 성능이 검증된 흑백 1 m, 다중 4 m 해상도의 고해상도 전자광학카메라(EOS-D)의 후속 제품에 대한 설계를 진행하고 있다.

설계 특성을 기반으로 광학계(Telescope)와 초점면 배열 장치(Focal Plane Assembly, FPA)로 나눠 열제어계 예비 설계(preliminary design)를 진행하였다. 광학계는 기존의 EOS-D와 설계 개념이 동일하기 때문에 특이 사항이 없을 것으로 판단되었으나, FPA의 경우 전자부/기계부의 설계에 상당 부분 변경이 발생, 설계 변경에 따른 영향 검토가 필요하게 되었다. 그러나 각각의 설계안에 대해 열해석 모델들을 작성하여 영향 검토를 수행하는 것은 한계가 있기 때문에 보다 효율적인 검토 방안을 모색하였다.

FPA의 열제어계는 영상 촬영 기간 중에 운용 범위 내로 온도를 유지하고 후속 영상 촬영에 문제가 없도록 빠른 시간 내에 온도 초기화를 완료하여 안정적인 열 환경을 제공하는 것을 목표로 한다[1-2]. 이 중에서 FPA 구조 설계의 영향을 가장 많이 받으며 설계 변경의 자유도는 상대적으로 낮은 온도 유지 항목에 대해 유용한 검토 방안이 있는지를 모색하였다. 그 결과, FPA 구조 설계에 따른 열 특성 기반의 온도 예측 방안을 도출하게 되었다. 도출한 온도 예측 방안에 대해 신뢰성 확인을 위해 열해석 결과와 비교해 보았으며, 비교적 정확한 온도 예측이 가능함을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 단순화 된 열 저항 해석 기반의 온도 예측 방안의 도출 과정 및 검증 결과, 그리고 이를 바탕으로 한 FPA 설계의 trade-off 및 최적화 방안에 대해 논하고자 한다.

II. 단순화 된 열 저항식의 유도

2.1 검토 대상 분석

검토 대상인 FPA는 Fig. 1과 같이 접속 구조물(interface bracket)을 이용하여 주 구조물인 FPA Housing의 위/아래에 FPA-1과 FPA-2가 각각 조립되는 구조이다. 이 부분에 대해 열적 관점에서 검토하자면, 약 10 W/m-K 정도의 상당히 작은 열전도율(thermal conductivity)을 갖는 Super Invar 재질의 접속 구조물과 약 0.4 W/m-K 정도의 매우 작은 열전도율을 갖는 접착제(adhesive)로 연결되므로, FPA-1/2와 FPA

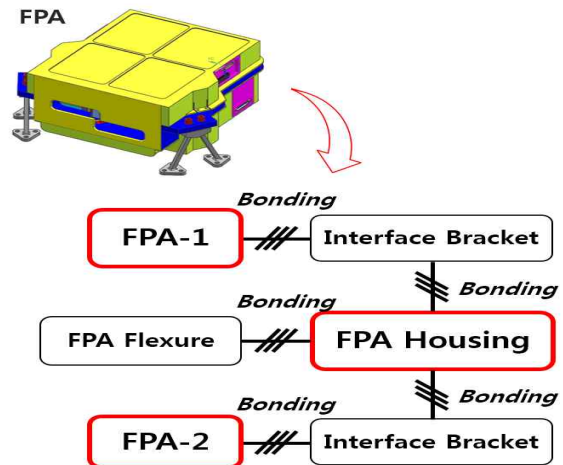


Fig. 1. Mechanical Configuration of FPA

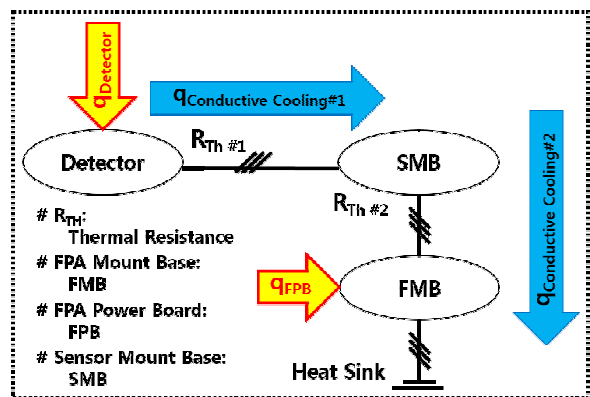


Fig. 2. Thermal Node Network of FPA

Housing은 열적으로 절연(thermal decoupling) 상태라고 간주할 수 있다.

또한 FPA-1과 FPA-2는 전기적, 기계적 설계, 그리고 운용 개념이 동일하기 때문에 둘 중 하나에 대해서만 열 특성을 검토하더라도 FPA 전체에 대한 열 특성을 검토한 것과 동일하다고 간주할 수 있다[3].

상기의 검토 결과를 바탕으로 FPA 전체가 아닌 FPA-1에 대해 열 저항 선도(thermal node network)를 검토하였으며, 이를 정리하면 Fig. 2와 같다.

2.2 단순화 된 열 저항식 도출

단순화 된 열 저항식 도출을 위해 먼저 다음과 같이 검토 조건을 정의하였다.

- ✓ 열전달/냉각은 전도 (conduction), 대류 (convection), 복사 (radiation) 모두에 의해 발생하지만, FPA의 운영 환경은 우주이므로 대류 효과 무시

- ✓ 영상 촬영 시작 시점(+20 °C)과 종료 시점(+30 °C)에서의 온도 차이가 작으므로 복사 효과 무시
- ✓ 내부 발열 및 전도 열 전달/냉각 효과로 온도 변화 발생

상기의 검토 조건 및 Fig. 2에 정의한 열 저항 선도를 바탕으로 FPA의 열적으로 의미가 있는 주요 부품에 대해 에너지 보존 법칙을 적용, 정리하면 식(1) ~ (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{st, FMB} &= \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_q \\ &= q_{Conductive Cooling\#2} - 0 + q_{FPB} \end{aligned} \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{st, SMB} &= \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_q \\ &= q_{Conductive Cooling\#1} - q_{Conductive Cooling\#2} + 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{st, D} &= \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_q \\ &= 0 - q_{Conductive Cooling\#1} + q_D \end{aligned} \quad (3)$$

- q_D [W]
: Dissipating Heat of Detector
- q_{FPB} [W]
: Dissipating Heat of FPB
- $q_{Conductive Cooling\#1}$ [W]
: Conductive Cooling Heat Transfer #1
- $q_{Conductive Cooling\#2}$ [W]
: Conductive Cooling Heat Transfer #2
- D : Detector

식 (1)의 $q_{Conductive Cooling\#2}$ 에 Fourier's Law와 에너지 보존 법칙(Law of Energy Conservation)을 적용, 간단하게 정리하면 다음과 같다[4].

$$\begin{aligned} m_{FMB} \times C_{FMB} \times \frac{T_{FMB, 2} - T_{FMB, 1}}{\Delta t} \\ = q_{FPB} + \frac{\int_{t_1}^{t_2} (T_{SMB}(t) - T_{FMB}(t)) dt}{R_{Th \#2} \times \Delta t} \end{aligned} \quad (4)$$

- m : Mass [kg]
- C : Specific Heat [J/kg-K]
- T : Temperature [K]
- $R_{Th \#2}$ [K/W]
: Thermal Resistance between FMB and SMB

즉, 전도 열전달인 $q_{Conductive Cooling\#2}$ 는 식 (4)와 같이 t_1 에서 t_2 까지의 기간에 대해 T_{SMB} 와 T_{FMB} 의 온도차를 시간에 대해 적분한 후, 이를 다시

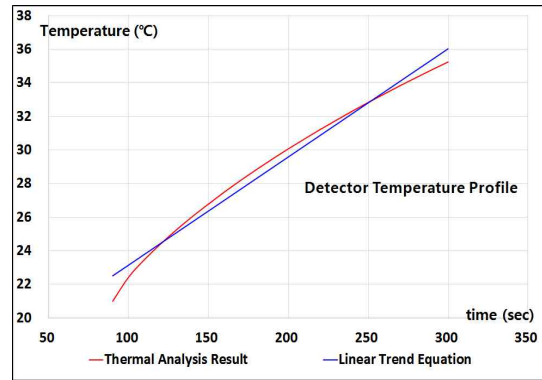


Fig. 3. Real vs. Linear Trend Equation

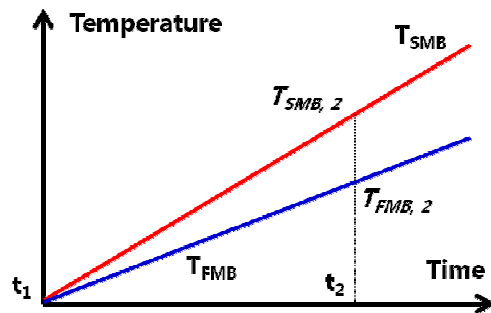


Fig. 4. Temp. Profile of Linear System

해당 기간으로 나눈 평균값으로 같음함으로써 단순화 시킬 수 있다.

발열에 의한 온도 변화의 경우, 실제 현상은 지수 함수적으로 이뤄지지만, 온도 변위가 크지 않다면 Fig. 3과 같이 관심 구간에 대해 선형 함수로 근사화 하여 검토하는 것이 가능하다.

즉, T_{SMB} 와 T_{FMB} 는 Fig. 4와 같이 시간에 대해 선형적으로 변한다고 간주할 수 있다. 따라서 초기 조건, 즉 t_1 에서 T_{SMB} 와 T_{FMB} 의 온도를 같다고 간주하고 T_{FMB} 에 대해 식 (4)를 정리하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} T_{FMB, 2} &= \frac{2 \times \Delta t \times R_{Th \#2}}{2 \times m_{FMB} \times C_{FMB} \times R_{Th \#2} + \Delta t} \\ &\times \left(q_{FPB} + \frac{m_{FMB} \times C_{FMB} \times T_{FMB, 1}}{\Delta t} + \frac{T_{SMB, 2}}{2 \times R_{Th \#2}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (2)를 보면 SMB는 직접적인 발열은 없으나 상대적으로 고온인 검출기(Detector)로부터 검출기의 전도 냉각열인 $q_{Conductive Cooling\#1}$ 을 받아 SMB 자체의 온도 상승에 일부를 사용하고, 나머지는 상대적으로 저온인 FMB에게 $q_{Conductive Cooling\#2}$ 로 방출함을 알 수 있다. 따라서 앞서와 마찬가지로

식 (2)를 간단하게 정리하면 식 (6)과 같다.

T_{SMB} 와 T_{FMB} , 그리고 T_D 역시 전도 열전달만이 발생한다고 가정하였으므로 시간에 대해 개별 온도는 선형적으로 변한다고 볼 수 있고, 초기온도가 같다고 하면 식 (7)과 같이 단순화 시킬 수가 있다. 따라서 식 (5)에서 유도한 $T_{FMB,2}$ 를 식 (7)에 대입하여 $T_{SMB,2}$ 에 대해 정리하면 식 (8)과 같이 SMB의 온도를 예측할 수 있게 된다.

$$m_{SMB} \times C_{SMB} \times \frac{T_{SMB,2} - T_{SMB,1}}{\Delta t} \quad (6)$$

$$= \frac{\int_{t_1}^{t_2} \left(T_D(t) - T_{SMB}(t) \right) dt}{R_{Th\#1} \times \Delta t} - \frac{\int_{t_1}^{t_2} \left(T_{SMB}(t) - T_{FMB}(t) \right) dt}{R_{Th\#2} \times \Delta t}$$

$R_{Th\#1} \quad [K/W]$

: Thermal Resistance between D and SMB

$$m_{SMB} \times C_{SMB} \times \frac{T_{SMB,2} - T_{SMB,1}}{\Delta t} \quad (7)$$

$$= \frac{T_{D,2} - T_{SMB,2}}{2 \times R_{Th\#1}} - \frac{T_{SMB,2} - T_{FMB,2}}{2 \times R_{Th\#2}}$$

마지막으로 식 (3)에 대해 앞서와 동일한 방식으로 식을 단순화 한 후, T_{SMB} 와 T_{FMB} 에 대해 각각 식 (5)와 식 (8)을 대입, 정리함으로써 웨도 상에서의 영상 촬영과 같이 짧은 구간에 대해 온도 변화량이 크지 않을 경우에 T_D 의 온도 예측이 가능한 식 (9)를 유도할 수 있다.

$$T_{SMB,2} = \frac{\frac{T_{D,2}}{2 \times R_{Th\#1}} + \frac{m_{SMB} \times C_{SMB} \times T_{SMB,1}}{\Delta t} + \frac{\Delta t}{2 \times m_{FMB} \times C_{FMB} \times R_{Th\#2} + \Delta t} \times \left(q_{FPB} + \frac{m_{FMB} \times C_{FMB} \times T_{FMB,1}}{\Delta t} \right)}{\left(\frac{m_{SMB} \times C_{SMB}}{\Delta t} + \frac{1}{2 \times R_{Th\#1}} + \frac{1}{2 \times R_{Th\#2}} - \frac{\Delta t}{(2 \times R_{Th\#2}) \times (2 \times m_{FMB} \times C_{FMB} \times R_{Th\#2} + \Delta t)} \right)} \quad (8)$$

$$T_{D,2} = \frac{1}{\alpha} \times \left[q_D + \frac{m_D \times C_D \times T_{D,1}}{\Delta t} + \frac{1}{2 \times R_{Th\#1}} \times \frac{\frac{m_{SMB} \times C_{SMB} \times T_{SMB,1}}{\Delta t} + \frac{\Delta t}{\beta} \times \left(q_{FPB} + \frac{m_{FMB} \times C_{FMB} \times T_{FMB,1}}{\Delta t} \right)}{\frac{m_{SMB} \times C_{SMB}}{\Delta t} + \frac{1}{2 \times R_{Th\#1}} + \frac{1}{2 \times R_{Th\#2}} - \frac{\Delta t}{(2 \times R_{Th\#2}) \times \beta}} \right] \quad (9)$$

where

$$\alpha = \frac{m_D \times C_D}{\Delta t} + \frac{1}{R_{Th\#1}} - \frac{1}{(2 \times R_{Th\#1})^2} \times \frac{1}{\frac{m_{SMB} \times C_{SMB}}{\Delta t} + \frac{1}{2 \times R_{Th\#1}} + \frac{1}{2 \times R_{Th\#2}} - \frac{\Delta t}{(2 \times R_{Th\#2}) \times \beta}}$$

$$\beta = 2 \times m_{FMB} \times C_{FMB} \times R_{Th\#2} + \Delta t$$

III. 단순화 된 열 저항식의 검증 및 고찰

3.1 검증용 열해석 모델 작성

단순화 된 열 저항식을 이용한 온도 예측의 신뢰성을 확인하기 위해 검토 대상에 대해 열-수치 모델(Thermal Math Model, TMM)을 작성, 비교하기로 하였다.

이를 위해 NX I-DEAS 6.0 TMG 프로그램을 이용하여 Fig. 5와 같이 검토 대상에 대한 열-수치 모델을 작성하였다.

열-수치 모델의 경우, FPA의 실제 열 특성 모사 및 확인이 목적이므로 앞서 단순화 된 열 저항식에서 단열로 간주한 FPA-1/2와 FPA

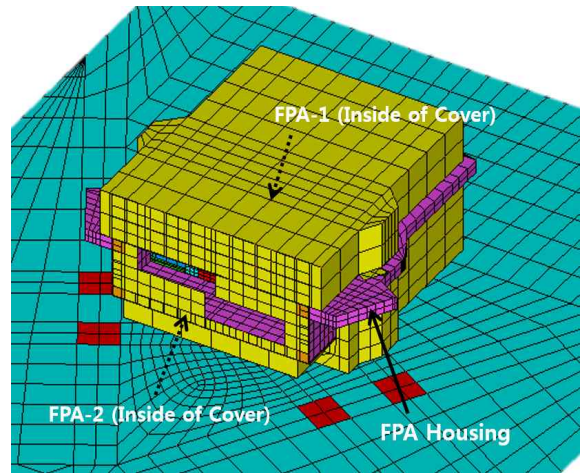


Fig. 5. Thermal Math Model Configuration

Housing 간의 열적 결합(thermal coupling)을 포함, FPA 전체에 대해 모델링하였으며, 또한 실제 현상인 복사 열 전달/냉각 효과도 모델링에 포함시켰다.

또한 FPA-1/2와 FPA Housing 간의 열적 결합의 경우, 열 저항 해석(thermal resistance analysis) 결과 약 29 K/W로 앞서 단순화 된 열 저항식 유도를 위해 절연 상태로 가정했던 것이 크게 벗어난 것이 아님을 확인할 수 있었다.

3.2 단순화 된 열 저항식의 검증

목표로 하는 영상 촬영 기간에 대하여 검토 대상의 열-수치 모델을 이용하여 열해석을 수행, 온도 추세를 정리하면 Fig. 6과 같다. 또한 단순화 된 열 저항식을 이용하여 예측한 값과 열해석 결과를 비교, Table 1에 정리하였다.

Table 1을 보면, FPA 개별 부품들의 열해석 결과와 단순화 된 열 저항식을 이용한 예측값 간의 오차는 각각 1.7 %, 0.9 %, 6.2 %로 열해석 모델을 이용하지 않더라도 상당히 정확한 예측이 가능함을 알 수 있다.

그러나 단순화 된 열 저항식은 t_1 에서 t_2 까지의 시간 동안에 발생하는 온도 증분을 기반으로 t_2 를 예측한다. 따라서 보다 물리적 의미가 있는 검토는 각각의 온도 증분을 비교하는 것이며, 이를 Table 2에 정리해 놓았다.

온도 증분에 대해 단순화 된 열 저항식의 예측값과 열해석 결과 비교 시, 검출기와 SMB의 오차는 5 % 이내로 단순화 된 열 저항식을 이용

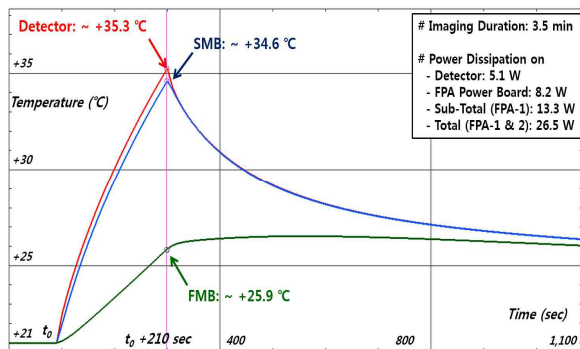


Fig. 6. Expected Temp. Profile of FPA

Table 1. Result Comparison: Expected Temp.

[Unit: °C]	TMM	Equation
Detector	+35.3	+35.9
SMB	+34.6	+34.3
FMB	+25.9	+27.5

Table 2. Result Comparison: del T

[Unit: °C]	TMM	Equation	Error
Detector	14.3	14.9	4.2 %
SMB	13.6	13.3	-2.2 %
FMB	4.9	6.5	32.7 %

한 온도 예측이 유효함을 알 수 있다. 이와 달리 FMB의 경우, 약 30 %에 달하는 상당한 양의 오차가 발생한 것을 볼 수 있는데, 이는 단순화 된 열 저항식을 유도하는 과정에서의 가정과 실제 현상의 차이 때문으로 판단된다.

즉, FPA-1/2의 FMB와 FPA Housing 간의 열적 결합에 의해 실제로는 FPA Housing으로 전도 열 전달/냉각이 발생되고 있으나, 본 단순화 된 열 저항식은 이 부분을 단열로 가정하였고, 따라서 전도 열 전달/냉각으로 소산되는 발열량 만큼 FMB의 온도 증분이 과도하게 예측되었다. 또한 FMB의 경우, 검출기나 SMB와 달리 결면적이 상당히기 때문에 복사 열전달/냉각 효과도 일정 수준 영향을 미쳤을 것으로 판단된다.

3.3 단순화 된 열 저항식의 고찰

그러나 FPA 열제어계 설계에 있어 허용되는 운영 온도의 폭이 가장 좁은, 즉 온도 유지에 가장 민감한 검출기의 경우, Table 1, 2에서 볼 수 있듯이 단순화 된 열 저항식을 이용한 온도 예측이 상당 부분 신뢰성이 있음을 알 수 있다.

즉, FPA의 초기 설계 단계에서 열해석 모델의 작성 및 이를 통한 열해석 수행, 결과 검토 과정이 없더라도 검출기의 온도를 쉽게 예측할 수 있다. 따라서 FPA 설계에 있어 주요 구속 조건 중에 하나인 검출기의 운용 온도를 만족시키는 설계안을 찾기 위한 trade-off를 열해석 모델을 작성하지 않더라도 본 단순화 된 열 저항식을 이용하여 보다 쉽고, 빠르게 수행할 수 있다.

이를 확인하기 위해 몇몇 설계 검토 대상에 대해 열해석 모델을 작성하여 열해석 결과와 단순화 된 열 저항식의 예측값 비교를 수행하였으며, Fig. 7에 열해석 결과에 따른 온도 추세를, 그리고 Table 3에 비교 결과를 정리해 놓았다.

검토 결과, Table 3과 같이 단순화 된 열 저항식을 이용하여 예측한 검출기의 온도와 열해석 결과 사이에 큰 차이가 없는 것을 알 수 있으며, 따라서 단순화 된 열 저항식을 이용한 검출기 온도 예측 및 이를 바탕으로 한 FPA 설계의 trade-off 수행은 기술적으로 의미가 있다고 할 수 있다.

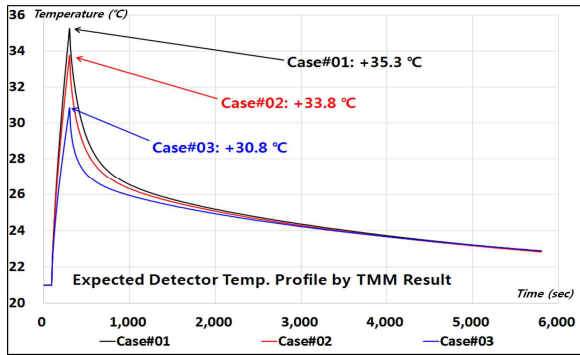


Fig. 7. Case Study Result: Case#01 ~ #03

Table 3. Result Comparison

Case	TMM	Equation	Error
Case#0 1	Value: +35.3 del T: 14.3	+35.9 14.9	— 4.2 %
Case#0 2	Value: +33.8 del T: 12.8	+34.3 13.3	— 3.9 %
Case#0 3	Value: +30.8 del T: 9.8	+31.0 10.0	— 2.0 %

- ✓ Case#01: 초기 설계안
- ✓ Case#02: SMB의 설계 수정
- ✓ Case#03: SMB의 설계 수정 + 재질 변경

3.4 단순화 된 열 저항식의 활용

앞서 고찰한 바와 같이 검출기의 경우, 단순화 된 열 저항식을 이용하여 영상 촬영 종료 시간에 서의 온도 예측 및 이를 바탕으로 적합한 설계안 도출을 위한 trade-off를 수행할 수 있다.

Figure 8은 검출기의 운영 온도 요구 조건인 +28 °C 이하를 만족시키는 설계안을 찾기 위해

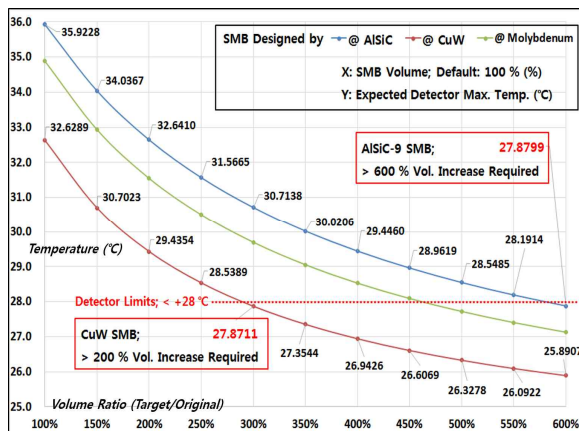


Fig. 8. Trade-Off Result by Equation

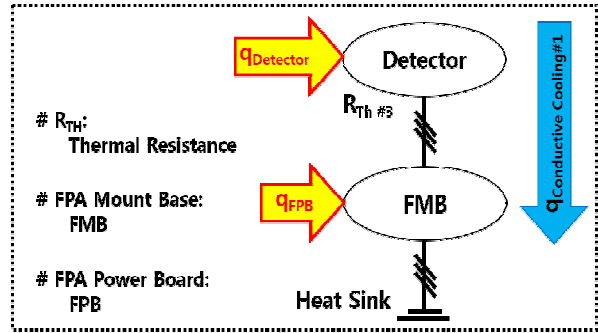


Fig. 9. Thermal Block Diagram of New Case

SMB의 재질 및 설계를 변경했을 때의 검출기의 예상 온도를 단순화 된 열 저항식을 이용하여 예측한 결과를 나타낸다.

또한 식 (9)에서 알 수 있듯이, m_{SMB} , C_{SMB} , m_{FMB} , C_{FMB} , $R_{Th \#1}$, 그리고 $R_{Th \#2}$ 가 검출기에 얼마만큼의 영향을 주는지 개별적으로 확인이 가능하므로, 설계 변경에 따른 영향 대비 효과 확인을 통한 효과적인 설계안 도출이 가능하다.

3.5 2 절점 시스템에의 적용 가능성 검토

지금까지 검토한 FPA의 형상은 기계 조립 및 광학 정렬의 용이성을 위해 검출기가 SMB라는 별도의 구조물을 통해 FMB에 조립되는, 즉 열제어 관점에서 보자면 3 절점(three-thermal nodes) 시스템의 형태였다.

이와 별도로, 임의의 설계 요구 조건에 의해 검출기를 FMB에 직접 조립하는, 즉 Fig. 9와 같은 2 절점(two-thermal nodes) 시스템에 대하여 단순화 된 열 저항식의 적용 가능성에 대해 검토해 보았다.

2 절점 시스템에 대해서도 앞서 3 절점 시스템에서와 동일하게 에너지 보존 법칙을 바탕으로 식 10, 11을 정의할 수 있으며, 마찬가지로 방법으로 검출기에 대해 유도, 정리하면 식 12를 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{E}_{st, FMB} &= \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_q \\ &= q_{Conductive Cooling \#1} - 0 + q_{FPA Power Board} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_{st, D} &= \dot{E}_{in} - \dot{E}_{out} + \dot{E}_q \\ &= 0 - q_{Conductive Cooling \#1} + q_{Detector} \end{aligned} \quad (11)$$

$R_{Th \#3}$
: Thermal Resistance between D and FMB

도출된 단순화 된 열 저항식을 이용하여 예측한 검출기의 온도와 열해석을 통해 얻은 온도를

$$T_{D,2} = \frac{q_D + \frac{m_D \times C_D \times T_{D,1}}{\Delta t} + \frac{\Delta t}{2 \times m_{FMB} \times C_{FMB} \times R_{Th\#3} + \Delta t} \times \left(q_{FPB} + \frac{m_{FMB} \times C_{FMB} \times T_{FMB,1}}{\Delta t} \right)}{\left(\frac{m_D \times C_D}{\Delta t} + \frac{1}{2 \times R_{Th\#3}} - \frac{\Delta t}{(2 \times R_{Th\#3}) \times (2 \times m_{FMB} \times C_{FMB} \times R_{Th\#3} + \Delta t)} \right)} \quad (12)$$

Table 4. Result Comparison: New Case

[Unit: °C]		TMM	Equation
Case#A	Value	+26.4	+27.3
	del T	5.4	6.3

비교, 정리하면 Table 4와 같다. 2 절점 시스템의 경우, 앞서 검토한 3 절점 시스템에 비해 온도 증분의 오차가 상당한 것을 알 수 있는데, 이는 앞서 검토한 바와 같이 FMB의 온도 증분이 과도하게 산출되었고, 이에 따라 FMB에 직접 연결되는 검출기의 온도도 실제보다 과도하게 예측됨에 기인된 것이다.

그러나 앞서 2차 시스템 형태에서 살펴보았듯이, 1차 시스템 형태에 대한 단순화 된 열 저항식 또한 FPA 설계안을 찾기 위한 trade-off에 일정 수준 이상/이하의 설계는 바로 배제할 수 있도록 해 줌으로써 상당 부분 기여를 할 수 있을 것으로 판단된다.

IV. 결 론

지금까지 FPA 열 특성을 기반으로 단순화 된 열 저항식의 유도 과정 및 검증 결과, 그리고 이를 이용한 trade-off 과정 및 효용성에 대해 살펴 보았다.

단순화 된 열 저항식은 FPA 설계 초기에, FPA 설계에 있어 주요 구속 조건 중에 하나인 검출기의 운용 온도를 열해석 모델의 작성 및 검토 과정 없이 확인, 보다 빠르고 효과적으로 trade-off를 수행할 수 있게 하기 위해 고안한 방안이다. 본 방안을 이용함으로써, 검출기의 온도를 빠르고 쉽게, 그리고 비교적 정확하게 예측할 수 있었다. 물론, 유도 과정에서의 가정 및 조건

들로 인해 일부 오차도 있으나, 해당 부분이 FPA의 설계에 미치는 영향이 미비하기 때문에 실제 단순화 된 열 저항식을 활용한 FPA 설계 trade-off에는 큰 영향이 없다.

별도로, 향후로도 단순화 된 열 저항식의 신뢰성 향상 및 오차 최소화를 위해 앞서 검토한 오차 발생 원인들을 바탕으로 오차 최소화를 위한 추가의 고민 및 노력을 계속 할 예정이다.

References

- 1) Jin-Soo Chang, Jong-Un Kim, Myung-Seok Kang, Seung-Uk Yang, Ee-Eul Kim, "Development and Verification of Thermal Control Subsystem for High Resolution Electro-Optical Camera System, EOS-D Ver.1.0", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 41, No. 11, 2013, pp. 921~930.
- 2) Jin-Soo Chang, Seung-Uk Yang, Yun-Hwang Jeong, Ee-Eul Kim, "Design and Development of Thermal Control Subsystem for an Electro-Optical Camera System", *Journal of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences*, Vol. 37, No. 8, 2009, pp. 798~804.
- 3) David G. Gilmore, *Spacecraft Thermal Control Handbook Second Ed.*, The Aerospace Press, 2002.
- 4) Frank P. Incropera, David P. Witt, *Fundamental of Heat and Mass Transfer Fifth Ed.*, WILEY, 2002.
- 5) *Methodology of Trade-Off and Optimization for FPA Thermal Design by Derivation of Thermally Theoretical Approach*, Satrec Initiative, SI-TEM-ST7-2014-001, Rev. 1.0, 2014.